

mgr inż. Krystyna Skotniczny

ORCID: 0000-0002-4142-5318

dr hab. Magdalena Kopernik, prof. AGH¹⁾

ORCID: 0000-0001-8705-6506

dr inż. Anna Rawska-Skotniczny^{2)*}

ORCID: 0000-0002-0997-5029

Problemy dotyczące modelowania obciążenia wiatrem obiektów budowlanych

The problems of wind load modelling on structures

DOI: 10.15199/33.2022.06.10

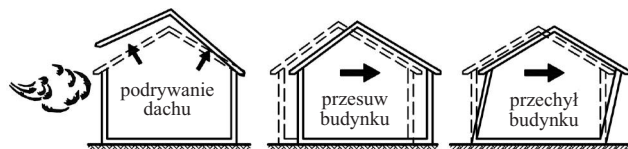
Streszczenie. Im bardziej skomplikowany kształt obiektu budowlanego, tym trudniej prognozować, jak będą na niego oddziaływały masy powietrza podczas przepływu. Problem jest istotny z uwagi na niezawodność obiektów budowlanych. Analizy numeryczne oraz badania doświadczalne pozwolą w przyszłości zmodyfikować wytyczne normowe, przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa obiektów budowlanych.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo; obciążenie wiatrem; modelowanie przepływu; metoda objętości skończonych.

Abstract. The more complex the shape of a building object, the more difficult it is to predict how air masses will affect it during flow. The problem is important for the reliability of buildings. Numerical analyses and experimental studies will allow future modification of the standard guidelines, contributing to the improvement of the safety of buildings.

Keywords: safety requirements; wind load; flow modelling; finite volume method.

Analiza obciążenia wiatrem konstrukcji budowlanych staje się współcześnie coraz bardziej istotna. Materiały budowlane mają coraz większą wytrzymałość, a jednocześnie są lżejsze i w efekcie konstrukcje nie są balastowane własną masą oraz są bardziej podatne na działanie wiatru. Maleje też ich odporność na poderwanie, przechył czy przesunięcie (rysunek 1).



Rys. 1. Przykładowe formy odpowiedzi budynku na działanie wiatru [1]

Fig. 1. Exemplary ways in which a building can respond to wind [1]

Czynniki wpływające na działanie wiatru

Parametry wpływające na intensywność obciążenia wiatrem to m.in. prędkość przepływających mas powietrza, charakterystyka terenu oraz rozmiar i kształt obiektu budowlanego. Największe problemy sprawia ilościowy i jakościowy opis wpływu kształtu budynku, uwzględniany za pomocą współczynników ciśnienia. Intensywność działania wiatru rośnie z wysokością budynku, co jest skutkiem zwiększenia prędkości wiatru wraz z oddalaniem się od powierzchni terenu, spowodowanego zmniejszaniem się wpływu tłumienia przepływu mas powietrza przez niską zieleń, drzewa i istniejącą zabudowę. Budynki smukłe, o dużym stosunku wysokości do szerokości, są bardziej podatne na działanie wiatru niż krępe. Wpływ na to oddziaływanie ma również kształt bryły obiektu. Wiatr silniej oddziałuje na ostre krawędzie przegród budowlanych, a wytłumia się na dużych płaszczyznach. Niektóre konstrukcje są

szczególnie silnie podatne na dynamiczne działanie wiatru, co jest skutkiem niekorzystnych zjawisk niestateczności aeroelastycznej [2, 3], które mogą też istotnie wpływać na sąsiednie obiekty, usytuowane po zawietrznej stronie tych obiektów.

Ze względu na nieograniczone możliwości kształtowania formy obiektu uwzględnienie każdego kształtu budynku w normach nie jest możliwe. W przypadku prostych brył wpływ wiatru można oszacować na podstawie normowych współczynników ciśnienia, jednak gdy budynek jest połączeniem co najmniej dwóch brył, staje się to trudne, a czasem analitycznie niemożliwe do wykonania [4]. Wtedy przeprowadza się badania doświadczalne w tunelach wiatrowych. W taki sposób był badany najwyższy budynek świata Burj Dubaj. W tunelu Politechniki Krakowskiej był badany model wrocławskiego Sky Tower i stadionu w Łodzi. Badania te są jednak kosztowne, dlatego stale rozwijane są programy komputerowe wykorzystujące teorie mechaniki płynów do symulacji tego obciążenia, w sposób jak najbliższy rzeczywistym oddziaływaniom.

Analizy numeryczne

Oddziaływanie wiatru odwzorowuje się jako ciśnienie wywierane na zewnętrzne powierzchnie budowli zamkniętych i wewnętrzne budynków nieszczelnych i z otwartymi przegrodami. Współczynniki ciśnienia c_{pe} można wyznaczyć, przekształcając zależność normową [5]:

$$c_{pe} = \frac{2 w_e}{c_e(z) \cdot \rho \cdot v_b^2} \quad (1)$$

gdzie:

w_e – ciśnienie wiatru na zewnętrznej powierzchni przegrody, wyznaczone z symulacji komputerowej przepływu mas powietrza;

$c_e(z)$ – współczynnik ekspozycji, zależny od wysokości budynku nad terenem z;

v_b – bazowa prędkość wiatru;

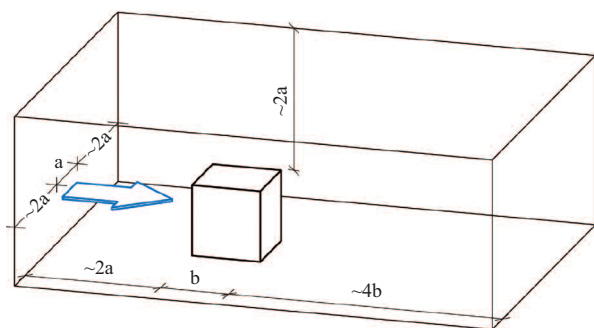
ρ – gęstość powietrza.

¹⁾ AGH Akademia Górniczo-Hutnicza; Wydział Inżynierii Metali i Informatyki Przemysłowej

²⁾ Politechnika Opolska; Wydział Budownictwa i Architektury

^{*}) Adres do korespondencji: a.rawska-skotniczny@po.edu.pl

Analizę numeryczną można wykonać w różnych programach. Na rynku dostępne są programy typowo inżynierskie oraz programy zaawansowane do numerycznej symulacji dynamiki płynów. Pierwsze działają na zasadzie „czarnej skrzynki”, inżynier może zweryfikować wyniki zasadniczo tylko na podstawie doświadczenia zawodowego. Programy te mają wiele ograniczeń, które wymuszają odpowiednie przygotowanie modelu. Zaleca się stosowanie modeli z zamkniętymi ścianami, o względnie tym samym rozmiarze. Symulację przepływu powietrza wokół konstrukcji można w nich wykonać w obliczeniowej domenie (rysunek 2), która umożliwia wizualizację map ciśnienia na modelu. Wykorzystują one metody dynamiki płynów, przez co strumień wiatru jest stały. Wyniki symulacji zależą od rozmiaru domeny, która najczęściej jest generowana automatycznie na podstawie wymiarów modelu. Modelowanie polega na zaprojektowaniu geometrii budynku i ustaleniu kierunku oraz prędkości wiatru. Przykłady praktycznego zastosowania takich programów można znaleźć w publikacjach, np. [6].



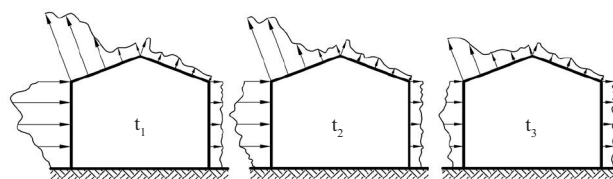
Rys. 2. Proporcje wymiarów domeny obliczeniowej i budynku
Fig. 2. Dimensional proportions of the tunnel and the building

Zaawansowane programy do numerycznej symulacji dynamiki płynów umożliwiają modelowanie dynamiki płynów nieściśliwych i ściśliwych oraz turbulencji za pomocą zaimplementowanych modeli. Użytkownik takiego programu musi jednak posiadać znajomość pewnych podstaw teoretycznych z dziedziny dynamiki płynów.

Wpływ turbulencji

Pierwotna droga wiatru zmienia się po napotkaniu budynku na drodze przepływu mas powietrza i w konsekwencji energia kinetyczna wiatru zamienia się w energię potencjalną ciśnienia. Złożoność opływu wiatru wokół budynku zależy od jego kształtu: na ścianach nawierzchni i połaciach dachów o dużym nachyleniu występuje parcie, podczas gdy ściany boczne, ściany zawietrzne i połacie dachów oraz dachy płaskie są zasysane na zewnątrz. Największe ciśnienie wiatr wywołuje w pobliżu krawędzi przegród, jest ono zmienne w czasie: największe na początku podmuchu wiatru w czasie t_1 , co wynika z wpływu turbulencji, natomiast wraz z upływem czasu przepływ ten się stabilizuje (rysunek 3).

Przepływ płynu o małej lepkości, jakim jest powietrze, przy dużej prędkości zwykle jest turbulentny i charakteryzuje się odchyleniami wartości prędkości, stąd ciśnienie ekstremalnego podmuchu wiatru na małych obszarach jest większe niż na dużych. Praktyczny aspekt tego zagadnienia pojawia się



Rys. 3. Rozkład ciśnienia zewnętrznego zmieniającego się w czasie z powodu turbulencji [7]

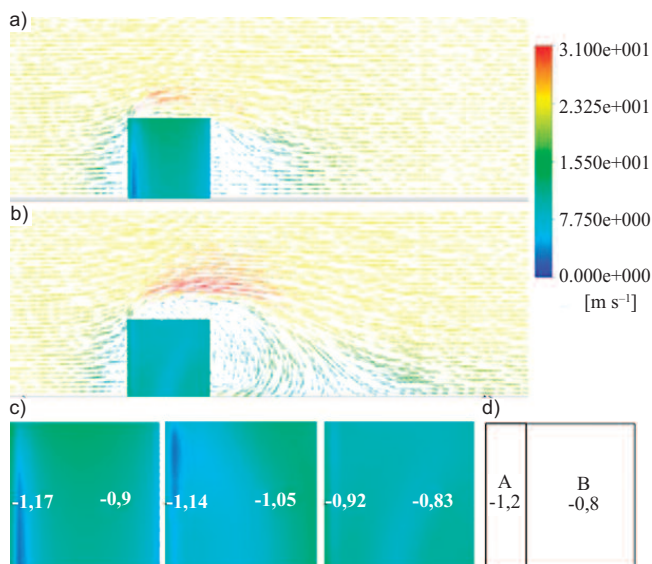
Fig. 3. Distribution of external pressure varying in time due to the turbulences, according to [7]

w projektowaniu: w strefie przy krawędziach bryły budynku powinno być więcej łączników, którymi mocowane jest poszycie do konstrukcji obiektu. Tam bowiem wiatr silniej oddziałuje i może zerwać to poszycie [5]. Dlatego parametry symulacji przepływu należy dobrać tak, aby z dobrym przybliżeniem odpowiadały rzeczywistym zjawiskom. W związku z tym duże znaczenie ma dobór odpowiedniego modelu turbulencji.

Obecnie w analizach dynamiki płynów równania Naviera-Stokesa rozwiązuje się metodami numerycznymi [8]. Najczęściej stosowana jest metoda objętości skończonych (MOS, ang. FVM), której przewagą nad pozostałymi jest możliwość modyfikacji kształtu i położenia objętości kontrolnych związanych z siatką modelu. Rozwiązanie zagadnienia dotyczącego przepływu turbulentnego zwykle wymaga uśredniania równań Naviera-Stokesa. Obecnie do przepływów aerodynamicznych zaleca się użycie zmodyfikowanego modelu turbulencji shear-stress transport ($k - \omega$ SST), który prawidłowo symuluje oddzielenie się przepływu od gładkiej powierzchni, jaką jest np. ściana budynku [9].

Analiza modelu budynku w programie ANSYS

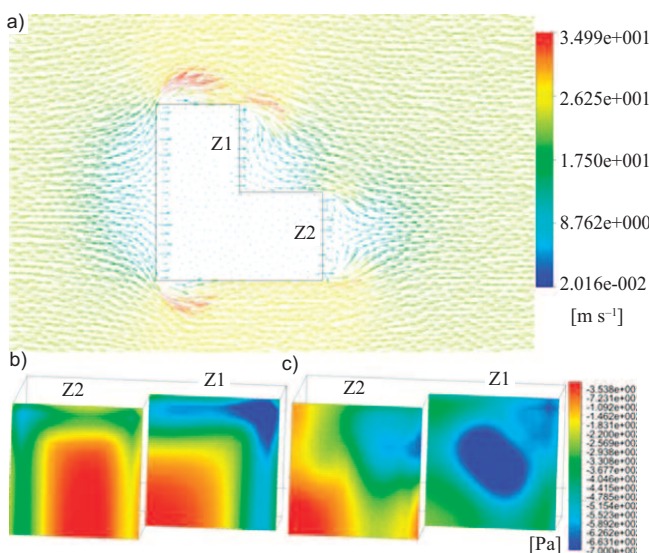
W celu kalibracji parametrów przeprowadzono analizę na prostym modelu budynku – sześciacie (rysunek 4), którego współczynniki ciśnienia są zdefiniowane w normie [5]. Aby zautomatyzować odczyt wartości ciśnienia z programu ANSYS Fluent R18.1, wykonano autorskie narzędzie w środowisku Java, umożliwiające przeliczenie ciśnienia odczytanego z modelu na współczynniki ciśnienia uwzględniające strefy podziału ścian ujęte w normie [5]. Rozmiar objętości skończonej modelu ustalono zgodnie z zaleceniami [10], a główne miary jakości siatki (jakość ortogonalną oraz pochylenie i wydłużenie elementów) zbadano wg [11]. Za miarę poprawności rozwiązania przyjęto błąd średniokwadratowy ϕ między wartościami współczynników odczytanych z normy a wynikami symulacji. Po analizie stwierdzono, że optymalnym rozwiązaniem jest symulacja z krokiem czasowym $1 \cdot 10^{-3}$ s. Odnotowano dosyć dużą rozbieżność między wynikami symulacji w stosunku do normy, sięgającą 40% [5]. O ile współczynniki na powierzchniach płaskich były zbliżone, to dosyć istotnie różniły się w miejscach występowania ostrych krawędzi budynku i w wielu miejscach po stronie niebezpiecznej (były zaniżone nawet o 30%). Z uwagi na zmienny wpływ turbulencji w czasie przeanalizowano zmianę rozkładu ciśnienia, co pozwoliło stwierdzić, że największe siły działają na początku uderzenia mas powietrza w budynek, a następnie przepływ stabilizuje się i wpływ turbulencji maleje.



Rys. 4. Rozkład prędkości mas powietrza w przekroju pionowym (m/s) w: a) 1 i b) 11 kroku czasowym; c) rozkład ciśnienia z modelu w kolejnych krokach czasowych z odczytanymi wartościami współczynników; d) wg normy [5]

Fig. 4. Velocity distribution of air masses in the vertical section (m/s) in: a) 1st and b) 11th time step; c) the distribution of pressure from the model in successive time steps with the coefficients; d) from the standard [5]

Najmniejszy błąd względem współczynników normowych uzyskano w okolicach 300. kroku, czyli w ok. 0,3 s rzeczywistego czasu przepływu, gdy masy powietrza przepłyną od wlotu domeny obliczeniowej do ściany nawietrznej budynku, po czym przepływ stabilizuje się i różnica między współczynnikami się zwiększa. Podobne analizy przeprowadzono w przypadku złożonego modelu budynku w kształcie litery L (rysunek 5).



Rys. 5. Rozkład: a) prędkości na budynku w kształcie litery L (m/s); b) ciśnienia w 40 oraz c) w 200 kroku czasowym (Pa, ściany zawietrzne)

Fig. 5. Distribution of: a) velocity for L-shaped building (m/s); b) pressure at 40th; c) 200th time step (Pa, leeward walls)

Wnioski

Współczynniki ciśnienia na przegrodach budynku, otrzymane z modelowania przepływu wiatru w programie Ansys, są dosyć dobrym przybliżeniem współczynników normowych, pod warunkiem przeprowadzenia złożonej analizy ich rozkładu w kolejnych krokach czasowych. Analiza taka jest jednak możliwa tylko w programach umożliwiających definiowanie kluczowych parametrów wpływających na symulacje przepływu, np. wykorzystujących metodę objętości skończonych.

W przypadku ściany nawietrznej współczynniki ciśnienia są niezależne od rzeczywistego czasu przepływu masy powietrza, a w przypadku pozostałych ścian zmieniają się wraz z upływem czasu, co jest spowodowane wpływami turbulencji. Największą zmienność współczynników ciśnienia c_{pe} można zaobserwować na ścianach bocznych, na ścianie zawietrznej oraz na styku tych ścian. Prowadzenie dalszych analiz jest uzasadnione praktycznie, przy czym konieczne jest potwierdzenie otrzymanych wyników eksperymentem fizycznym przeprowadzonym w tunelu wiatrowym.

Literatura

- [1] Rawska-Skotniczny A. Obciążenia budynków i konstrukcji budowlanych według Eurokodów. Wyd. II. Warszawa. WN PWN. 2014.
- [2] Żurański JA. Oddziaływania klimatyczne w normach projektowania konstrukcji. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska. 2011; 58: 301 – 320.
- [3] Kociniak M. Wind loading on shell structures on example of CICIND and Eurocode standards. Materiały Budowlane. 2019; 2: 2 – 5, doi.org/10.15199/33.2019.02.01.
- [4] Gaczek M. Oddziaływanie wiatru na dachy budynków. Materiały Budowlane. 2019; 6: 6 – 9.
- [5] PN-EN 1991-1-4 Eurokod 1. Oddziaływania na konstrukcje. Część 1-4. Oddziaływania wiatru.
- [6] Gierczak J, Ignatowicz RL. Katastrofa budowlana hali stalowej podczas montażu. Materiały Budowlane. 2016; 5: 70 – 1, doi.org/10.15199/33.2016.05.33.
- [7] Holmes JD, Syme MJ. Wind loads on Steel-Framed Low-Rise Buildings. Steel Construction. 1994; 4: 2 – 12.
- [8] Kopernik M et al. Discrete phase model of blood flow in a roughness microchannel simulating the formation of pseudointima. Acta Bioeng Biomech. 2022; 24: 134 – 144; doi: 10.37190/ABB-01989-2001-02.
- [9] Hu P. et al. Numerical simulations of the mean wind speeds and turbulence intensities over simplified gorges using the SST $k-\omega$ turbulence model. Eng App of Comp Flu Mech. 2016; 1: 361 – 374, doi.org/10.1080/19942060.2016.1169947.
- [10] Celik IB. et al. Procedure for estimation and reporting of uncertainty due to discretization in CFD applications. J Flu Eng-Tran. 2008: 7.
- [11] Wibowo TT et al. Numerical study of the effect of geometry variation on the performance of innovative design wind speed enhancer. E3S Web Conf. 2018; 42: 1 – 9, doi.org/10.1051/e3sconf/20184201013.

W artykule wykorzystano analizy z pracy magisterskiej K. Skotnicznej „Analiza możliwości modelowania obciążenia wiatrem i opracowanie narzędzia przeliczającego ciśnienie na współczynniki stref obciążeń”, która otrzymała wyróżnienie w konkursie „Diamenty AGH 2021”.

Przyjęto do druku: 23.05.2022 r.